

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

1.1 Sumber Batuan Sampel Penelitian

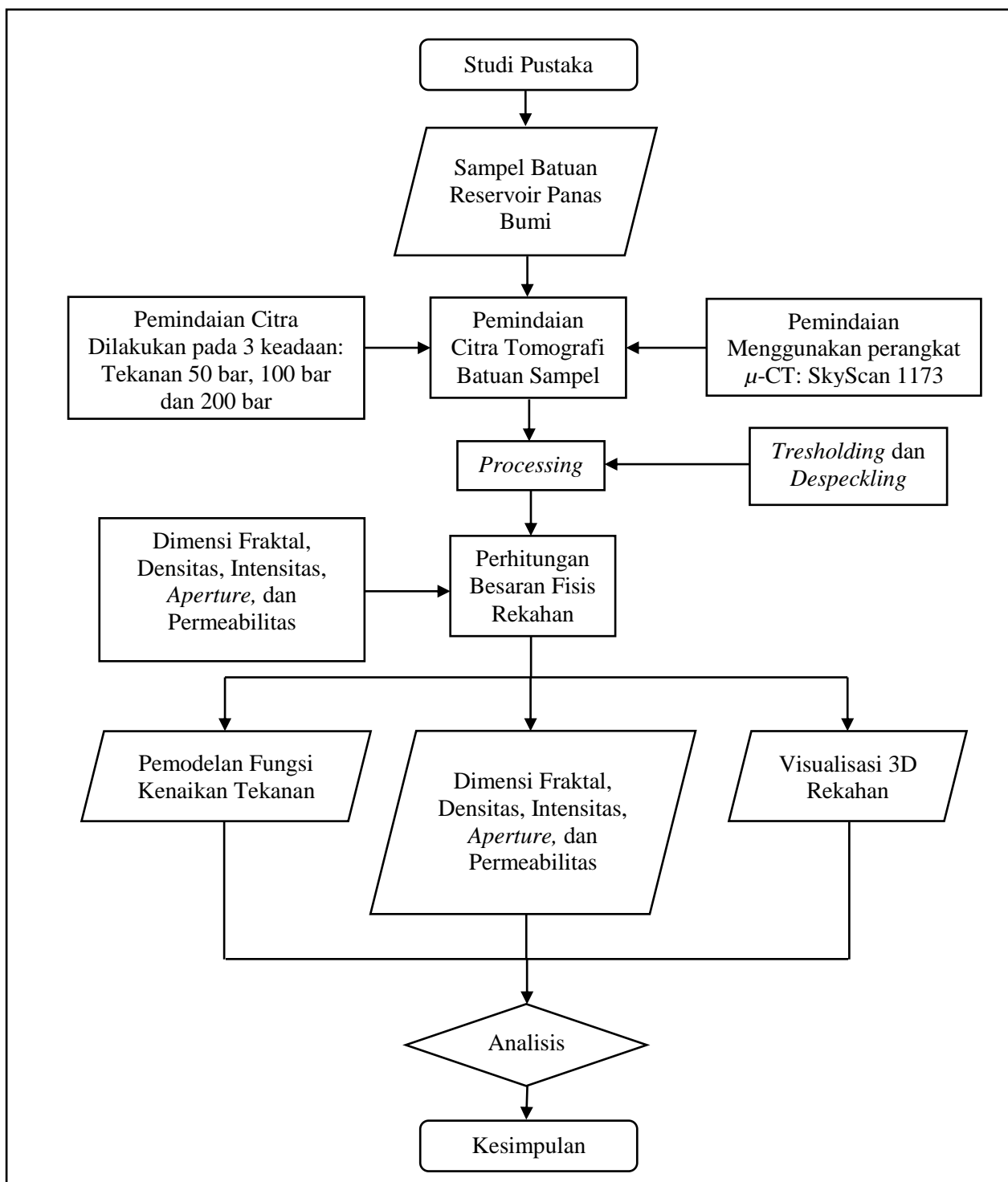
Data batuan sampel penelitian diperoleh dari daerah Sumani, Sumatera Barat, dengan ketinggian 500 - 1100 mdpl. Sampel citra 3D diambil dari batuan pada sumur produksi panas bumi di Area Geotermal Sumani, Sumatera Barat. Batuan sampel diambil pada kedalaman 500 m dari 760 m kedalaman total sumur. Sampel dikonstruksi menjadi sebuah silinder kecil dengan sisi 4,5 cm dan tinggi 2 cm.



Gambar 3. 1 Sampel batuan reservoir panas bumi SMN-1 pada kedalaman 500 m

1.2 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis rekahan buatan 3D yang terbentuk akibat dari pengaruh tekanan tinggi. Akuisisi data untuk rekahan 3D dilakukan dengan pemindaian citra tomografi batuan pada tiga keadaan yang berbeda antara lain keadaan tekanan 50 bar, 100 bar, dan 200 bar. Adapun alur penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Diagram alir studi perubahan struktur rekahan 3D dan pemodelannya batuan panas bumi

Dari alur penelitian yang tertera pada Gambar 3.2, terdapat tiga keadaan pemberian perlakuan tekanan yang diberikan pada sampel batuan antara lain tekanan 50 bar, 100 bar, dan 200 bar. Nilai tersebut berdasarkan tekanan

reservoir pada batuan sampel yang diambil. Pemberian perlakuan tekanan ini menggunakan peralatan pengujian kuat tekan uniaksial.



Gambar 3. 3 Mesin Kuat Tekan Uniaxial

Adapun tahapan pemberian perlakuan tekanan pada sampel batuan adalah sebagai berikut:

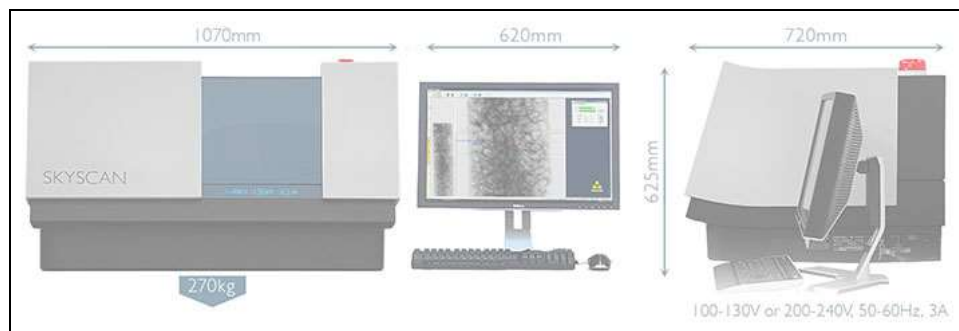
1. Meletakkan sampel di antara plat baja dan diatur agar tepat dengan plat form penekanan alat.
2. Menyalakan mesin uji *uniaxial* sehingga sampel berada di tengah-tengah apitan plat baja dan pastikan bahwa kedua permukaan sampel telah menyentuh plat baja tersebut.
3. Mengatur masukan diameter sampel pada 4,5 cm.
4. Mengatur skala pengukuran beban pada keadaan netral (nol).
5. Membaca jarum penunjuk pembebanan pada aksial dial gauge per 30 detik setiap kenaikan 1MPa (10 bar) hingga tekanan yang diinginkan.

1.3 Rekonstruksi dan Karakterisasi Rekahan 3D

1.3.1 Rekonstruksi Rekahan 3D

a. Pemindaian Citra 3D Sampel Batuan

Pemindaian citra 3D sampel batuan menggunakan alat bantu μ -CT: SkyScan 1173. SkyScan 1173 merupakan pemindai komputer tomografi berskala mikro (*micro computed tomography (CT) scanner*), model alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.4. Hasil dari pemindaian sampel tersebut menghasilkan sekumpulan citra skala keabuan (*greyscale*) digital 2D yang dikenal sebagai *raw image* di mana pada citra tersebut tingkat keabuannya merepresentasikan tingkat atenuasi pada citra tersebut. Selanjutnya citra *raw image* tersebut direkonstruksi agar mendapat citra sayatan tipis secara horizontal. Setelah tahap rekonstruksi, citra dianalisis menggunakan metode *Digital Image Analysis* pada berbagai perangkat lunak pengolahan citra.



Gambar 3. 4 μ -CT: SkyScan 1173 (sumber: <http://bruker-microct.com>)

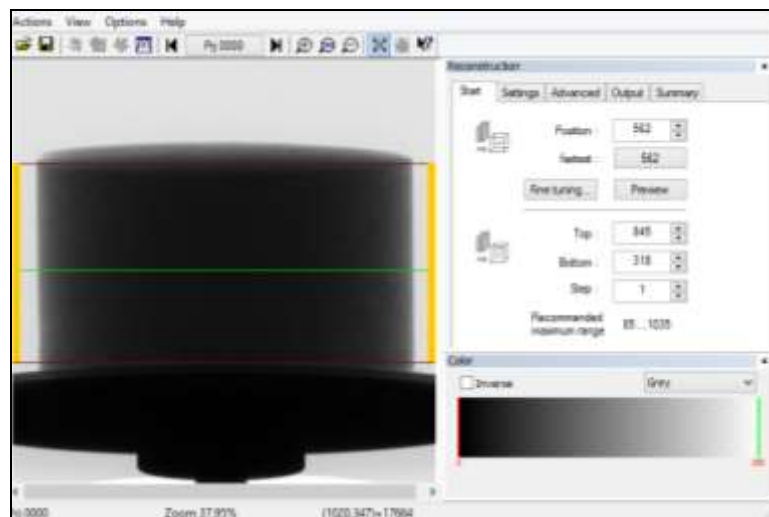
Proses pemindaian sampel dapat dijelaskan sebagai berikut, sinar-X yang dipancarkan oleh sumber akan merambat dalam garis lurus sehingga energi dari sinar-X tersebut dapat menembus batuan sampel, hal ini mengakibatkan sebagian energi pada sinar-X akan mengalami atenuasi, sehingga intensitas sinar-X yang tereduksi akan direkam oleh detektor sebagai cahaya tampak yang kemudian diubah menjadi elektron dengan bantuan chip semikonduktor CCD. Bentuk elektron tersebut diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) ke dalam bentuk citra digital bayangan sampel yang dapat dilihat pada Gambar 3.5. Pemindaian ini menggunakan sumber arus dan tegangan sebesar $61 \mu\text{A}$ dan 130 kV .



Gambar 3. 5 Data hasil keluaran dari proses pemindaian sampel (*raw image*)

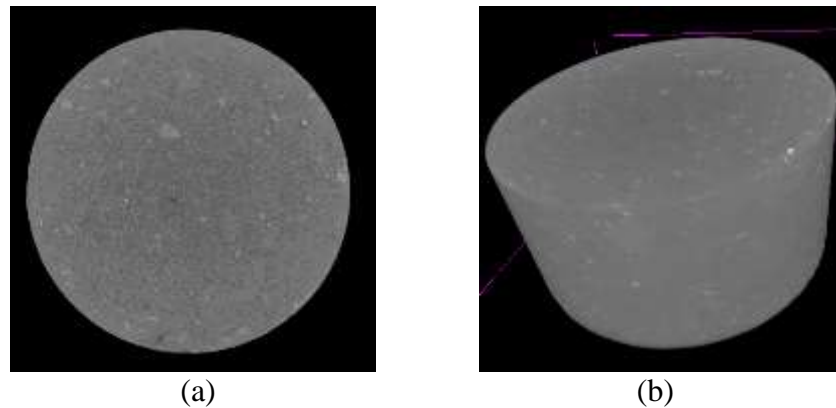
b. Rekonstruksi Data Digital Sampel Batuan

Rekonstruksi adalah proses pengirisan *cross-section* bayangan hasil pemindaian menjadi citra sayatan tipis (*thin section image*) per 1 piksel yang diiris pada arah *z*. Proses ini menggunakan perangkat lunak NRecon. Tampilan NRecon dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Tampilan perangkat NRecon

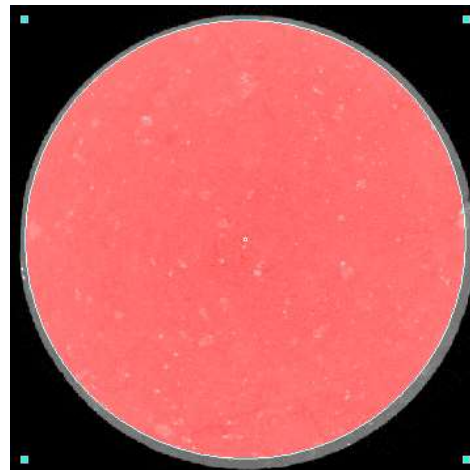
Banyaknya *thin section* yang dihasilkan pada proses rekonstruksi ini bergantung pada *Top*, *Bottom* dan *step*-nya. Pada penelitian ini setiap perlakuan akan direkonstruksi pada parameter yang sama dan menghasilkan 560 citra *thin section*. Salah satu contoh hasil dari rekontruksi untuk setiap keadaan dapat dilihat pada Gambar 3.7, sedangkan visualisasi dalam bentuk 3D menggunakan perangkat lunak CTVox dengan input semua *thin section* hasil rekonstruksi.



Gambar 3. 7 Citra hasil rekonstruksi. (a) *thin section* 2D dan (b) visualisasi 3D

c. Region of Interest (ROI)

ROI adalah pemilihan suatu daerah dari sampel yang akan dianalisis lebih lanjut, sehingga sampel yang dipindai akan mengalami pemotongan citra. ROI dilakukan karena sampel batuan tidak utuh kubus dan beberapa dari bagian sampel menjadi pecahan akibat perlakuan tekanan yang diberikan. ROI yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.8 lingkaran berwarna merah.

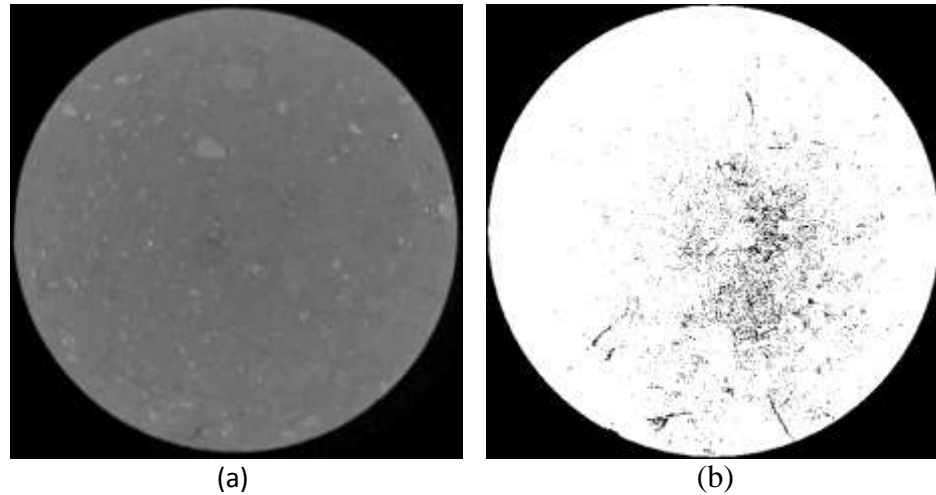


Gambar 3. 8 Penentuan ROI pada sampel batuan

d. Pengubahan Data ke *Binary* (*Thresholding*)

Thresholding merupakan tahapan merubah citra hasil rekonstruksi menjadi citra biner (Gambar 3.9). Tahapan ini merupakan tahapan penting

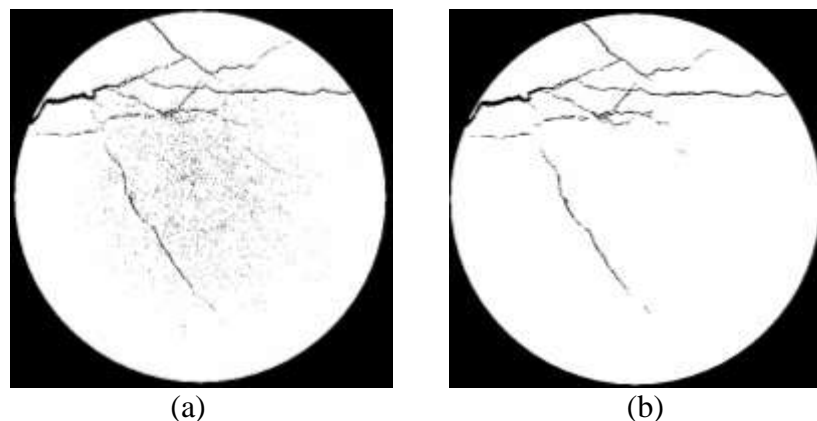
karena semua data yang akan dianalisis merupakan citra biner. Pada *thresholding* ini, warna hitam (ber-piksel 0) menandakan pori dan rekahan batuan sedangkan warna putih (ber-piksel 1) menandakan matriks batuan.



Gambar 3. 9 Pengkonversian citra ke biner. (a) *thin section* sampel batuan berwarna *grayscale* dan (b) citra biner hasil konversi *thresholding*

e. Pengisolasian Rekahan (*Despeckling*)

Citra hasil dari pemindaian berupa matriks, pori, dan rekahan. *Despeckling* merupakan tahapan pengisolasian rekahan yang berarti penghilangan pori-pori (*speckles* hitam). Tahapan ini dilakukan karena pada penelitian ini yang akan dianalisis adalah rekahan 3D batuan.

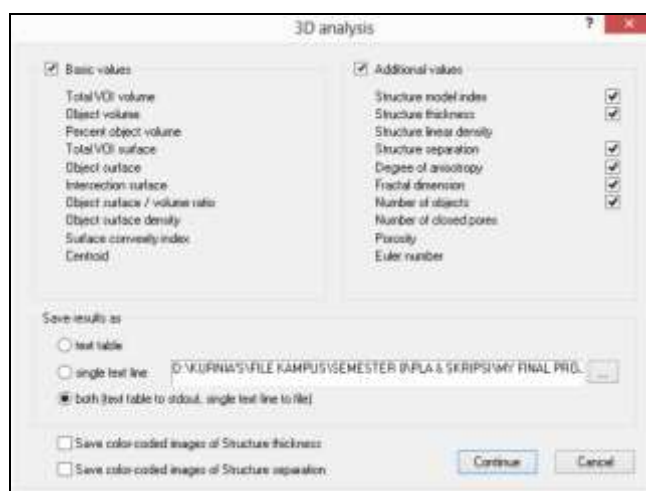


Gambar 3. 10 Proses *despeckling* (a) citra sampel sebelum *despeckling* (b) citra sampel setelah *despeckling*

1.3.2 Karakterisasi Rekahan 3D

a. Analisis Parameter Utama Rekahan

Karakterisasi rekahan sampel batuan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CTAn, ImageJ, dan MATLAB. Analisis menggunakan perangkat lunak CTAn dalam estimasi *aperture* (e) rekahan. Setelah melakukan semua tahapan pengolahan citra di atas, analisis CTAn yang mewakili besaran *aperture* adalah *structure separation*. Pada tab *Internal* dalam CTAn, terdapat pilihan “3D Analysis” yaitu pilihan untuk analisis 3D hasil rekonstruksi. Di dalam “3D Analysis”, terdapat pilihan analisis *structure separation*, yang dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Tampilan 3D kolom *Analysis* pada CTAn

ImageJ membantu dalam proses perhitungan panjang rekahan menggunakan perhitungan skeletonisasi, perhitungan panjang ini akan sulit dihitung secara manual karena terdapat rekahan yang diskontinuitas, nilai dari panjang ini akan dibagi dengan volume sampel yang bernilai intensitas rekahan. Pada tab *Plugin* terdapat pilihan *Skeletonize* dan *Skeleton Analysis*. Perlu di pastikan terlebih dahulu bahwa sebelum dilakukan skeletonisasi citra harus dalam bentuk biner. Setelah pengubahan skeletonisasi baru dapat dianalisis, yang menghasilkan data panjang rekahan baik itu rekahan yang kontinyu maupun rekahan yang diskontinyuitas.

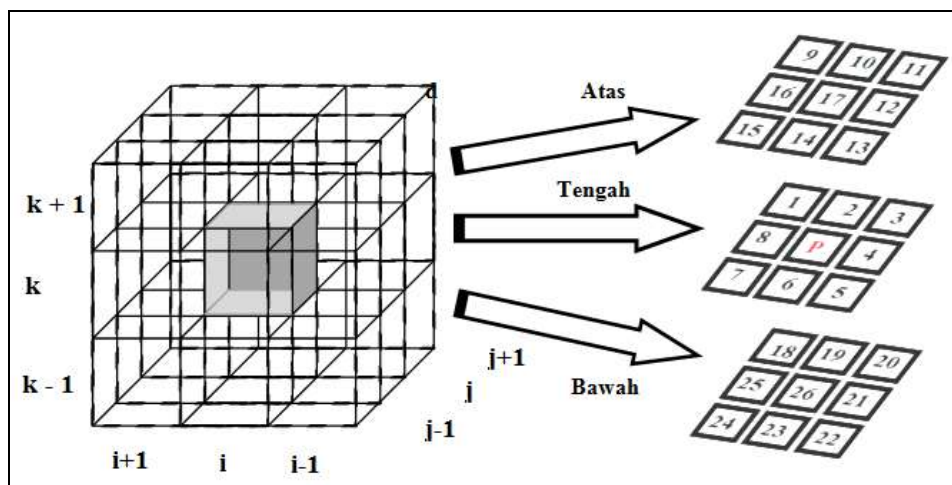
MATLAB membantu dalam perhitungan densitas rekahan. Dalam hal ini densitas berarti bahwa total volume rekahan terhadap total volume sampel seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.8).

b. Perhitungan Dimensi Fraktal

Dimensi fraktal dihitung dengan menggunakan metoda *box-counting* seperti yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya (Li & Huang, 2015; Miao dkk., 2015; Feranie dkk., 2011). Metode perhitungan dimensi fraktal 3D menggunakan *box-counting* sama halnya dengan perhitungan dimensi fraktal pada rekahan 2D.

c. Perhitungan Besaran Transpor Fluida

Besaran transpor yang akan dikarakterisasi adalah porositas, tortuositas, dan luas permukaan spesifik dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Sampel SMN-1 yang akan dikarakterisasi akan dikonstruksi ke dalam bentuk matriks ($l\ m\ n$). Bentuk perhitungan tersebut berdasarkan model 3D pada Gambar 3.12 (Feranie dkk., 2011).



Gambar 3. 12 Bilangan koordinat matriks pada model batuan 3D (Feranie dkk., 2011)

Huruf i , j dan k merupakan koordinat satuan pada sumbu x , y , dan z secara berturut-turut. Selanjutnya, makna $i+1$ dan $i-1$; $j+1$ dan $j-1$; $k+1$ dan $k-1$ merupakan pertambahan koordinat dan pengurangan koordinat. Kotak abu-abu (P) pada gambar 3.12 adalah titik acuan koordinat. Sehingga koordinat matriks relatif terhadap kotak P dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1
Koordinat matriks relatif terhadap P

Koordinat matriks	
2	$A(i, j+1, k)$
3	$A(i-1, j+1, k)$
1	$A(i+1, j+1, k)$
4	$A(i-1, j, k)$
8	$A(i+1, j, k)$
6	$A(i, j-1, k)$
5	$A(i-1, j-1, k)$
7	$A(i+1, j-1, k)$
17	$A(i, j, k+1)$
12	$A(i-1, j, k+1)$
16	$A(i+1, j, k+1)$
10	$A(i, j+1, k+1)$
11	$A(i-1, j+1, k+1)$
9	$A(i+1, j+1, k+1)$
14	$A(i, j-1, k+1)$
13	$A(i-1, j-1, k+1)$
15	$A(i+1, j-1, k+1)$
26	$A(i, j, k-1)$
21	$A(i-1, j, k-1)$
25	$A(i+1, j, k-1)$
19	$A(i, j+1, k-1)$
20	$A(i-1, j+1, k-1)$
18	$A(i+1, j+1, k-1)$
23	$A(i, j-1, k-1)$
22	$A(i-1, j-1, k-1)$
24	$A(i+1, j-1, k-1)$

Warna merah, biru, dan hijau menunjukkan subkubus di bagian tengah, atas, dan bawah secara berurutan.

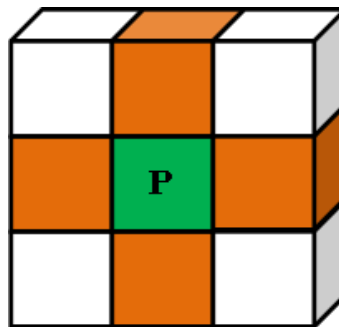
Setelah mengetahui koordinat setiap koordinat matriks pada model 3D, maka selanjutnya adalah langkah pengecekan aliran fluida. Sejauh yang diketahui fluida dapat mengalir melalui pori-pori yang saling terhubung (*connected pore*), sehingga terlebih dahulu harus dilakukan pengecekan terhadap jalur alirannya.

Metode yang digunakan adalah *random walk method*, dalam metode ini dilakukan pengecekan setiap elemen pori pada koordinat matriks tetangga terdekat, sehingga terbentuklah suatu aliran. Algoritma pengecekan koordinat yang digunakan adalah sebagai berikut.

2 – 3 – 1 – 4 – 8 – 17 – 12 – 16 – 10 – 11 – 9 – 14 – 13 – 15 – 6 – 5 – 7 – 26 – 21 – 25 – 19 – 20 – 18 – 23 – 22 – 24

Algoritma di atas dapat merupakan algoritma prioritas aliran fluida. Misalkan aliran fluida terlihat seperti Gambar 3.13. Jika saat *pointer* berada di P kubus, nilai panjang aliran adalah nol [$L' = 0$], ini merupakan titik awal aliran, maka saat *pointer* aliran bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye nilai panjang aliran menjadi [$L' = L' + 1$]. Contoh perpindahan koordinat yang bergerak lurus berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut berikut (Fauzi & Ariwibowo, 2006).

$P \rightarrow 2, P \rightarrow 4, P \rightarrow 6, P \rightarrow 8, P \rightarrow 17, \text{ dan } P \rightarrow 26.$



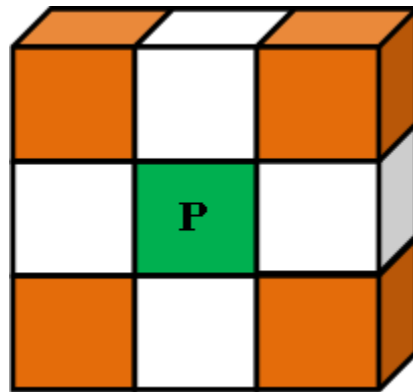
Gambar 3. 13 Perpindahan aliran fluida P pada jalur lurus (Fauzi & Ariwibowo, 2006)

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar 3.14. Jika saat *pointer* aliran berada di P nilai panjang aliran [$L' = 0$] sebagai titik awal aliran, maka saat aliran fluida bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye nilai panjang aliran menjadi [$L' = L' + \sqrt{2}$]. Contoh perpindahan *pointer* yang bergerak pada jalur diagonal bidang berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut:

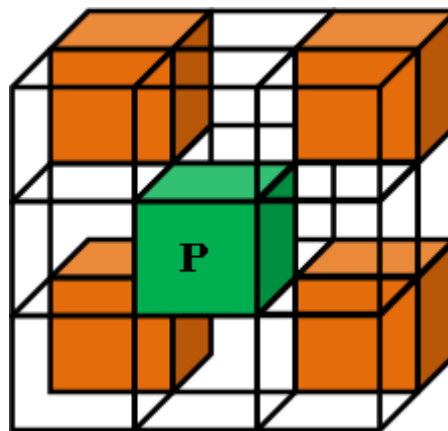
$P \rightarrow 1, P \rightarrow 3, P \rightarrow 5, P \rightarrow 7, P \rightarrow 10, P \rightarrow 12, P \rightarrow 14, P \rightarrow 16, P \rightarrow 19, P \rightarrow 12, P \rightarrow 21, P \rightarrow 23, \text{ dan } P \rightarrow 25$

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar 3.15. Jika saat *pointer* aliran berada di P nilai panjang aliran $[L' = 0]$ sebagai titik awal aliran, maka saat aliran bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye yang berada pada diagonal ruang, maka nilai panjang aliran menjadi $[L' = L' + \sqrt{3}]$. Contoh perpindahan *pointer* yang bergerak pada jalur diagonal ruang berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut:

$P \rightarrow 9, P \rightarrow 11, P \rightarrow 13, P \rightarrow 15, P \rightarrow 18, P \rightarrow 20, P \rightarrow 22, \text{ dan } P \rightarrow 24$



Gambar 3. 14 Perpindahan aliran fluida P pada jalur diagonal bidang (Fauzi & Ariwibowo, 2006)



Gambar 3. 15 Perpindahan aliran fluida P pada jalur diagonal ruang (Fauzi & Ariwibowo, 2006)